

Разработка сегнетоэлектрического полевого транзистора на основе HfO_2 на гибкой биосовместимой платформе

А.А. Чуприк, В.В. Михеев, Е.В. Коростылев, Е.К. Кондратюк,
И.Г. Марголин, Е.А. Губерна, Д.В. Негров

*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
141701 Долгопрудный, Россия
e-mail: chouprik.aa@mipt.ru*

В настоящее время широкое применение получили нейронные имплантаты – технические системы, которые используются для стимуляции частей и структур нервной системы с помощью имплантированных электрических схем или регистрации электрической активности нервных клеток. Прогресс в технологии нейропротезирования привел к прогрессу в терапии неврологических заболеваний. В частности, глубокая стимуляция мозга помогает пациентам, страдающим болезнью Паркинсона, а также является вариантом лечения тяжелых психических заболеваний, таких как депрессия и обсессивно-компульсивное расстройство, эпилепсия и другие психические расстройства.

Для следующего поколения электроники, используемой в биомедицинских имплантатах, требуется разработка гибких активных элементов, в потенциале, микроконтроллеров, включая транзисторы и энергонезависимую память для хранения данных. Элементы энергонезависимой памяти должны обладать высокой плотностью интегрирования, низким энергопотреблением, высоким быстродействием, большим ресурсом и однородностью рабочих параметров. Одним из наиболее привлекательных вариантов является сегнетоэлектрический (СЭ) полевой транзистор, который относится к неdestructивным типам энергонезависимой памяти, что существенно увеличивает ресурс устройств и упрощает архитектуру памяти их основе, что, в свою очередь, позволяет достичь высокой плотности ячеек памяти.

До недавнего времени в качестве функциональных материалов в гибких сегнетоэлектрических полевых транзисторах рассматривались только СЭ полимеры и органические кристаллы в силу их собственной гибкости. Однако применение данных материалов в электронике существенно ограничено малой скоростью переключения СЭ поляризации и высокими коэрцитивными напряжениями. Классические неорганические СЭ материалы, такие как титанат-цирконат свинца, имеют высокую скорость переключения и большую остаточную поляризацию. Однако при этом толщина пленок составляет сотни нанометров. Такие толстые пленки испытывают слишком большие внутренние механические напряжения при изгибах. Кроме того, высокие температуры, используемые при кристаллизации пленок, ограничивают их применение для гибких устройств.

Новые перспективы в разработке гибкого СЭ полевого транзистора появились с открытием СЭ свойств в сверхтонких (4-30 нм) пленках оксида гафния HfO_2 [1], поскольку данный материал обладает высокой остаточной поляризацией, широкой запрещенной зоной (> 5 эВ) и при этом полностью совместим с современной кремниевой технологией. Поскольку СЭ свойствами обладают сверхтонкие пленки, то есть механические напряжения в них малы, применение данного материала в гибкой электронике имеет очень большой потенциал. Гибкие СЭ конденсаторы и полевой эффект в транзисторе на основе HfO_2 с SiO_2 каналом были впервые продемонстрированы в 2017 г. [2]. Применение в качестве каналов таких материалов, как фуллерены, требует использования ручных манипуляций и дает низкий выход годных среди изготовленных прототипов. В данной работе в качестве материала полупроводникового канала мы предлагаем использовать гидрогенизированный аморфный кремний aSi:H – материал, обработка которого осуществляется с помощью широко известных технологических процессов. Параллельно, в связи с высоким интересом к графену как функциональному материалу оптоэлектроники, мы разрабатываем гибкий СЭ полевой транзистор с графеновым каналом, который может

стать базовым элементом не только микроэлектронной памяти, но и устройств переключаемой оптоэлектроники.

Нейронные имплантаты должны соответствовать общим требованиям, чтобы получить одобрение в качестве медицинского устройства: они не должны наносить вред организму и должны оставаться стабильными и функциональными в течение определенного срока службы (~ 10 лет). Именно поэтому здесь затруднено применение неорганических гибких подложек. В данной работе мы используем полиимидные полимерные пленки (они же представляют собой герметичную упаковку). Их ключевыми свойствами является термостойкость, высокая механическая прочность, высокая гибкость, отличные электроизоляционные свойства и высокая инертность к химическим реакциям.

К настоящему моменту на пути к созданию сегнетоэлектрического полевого транзистора на основе HfO_2 на гибкой биосовместимой платформе были решены следующие технологические и научные задачи: 1) определены оптимальные условия стабилизации СЭ структурной фазы в пленках $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ (10 нм) при кристаллизации на полиимиде, 2) разработан процесс роста полупроводниковых aSi:H пленок, 3) разработан технологический процесс изготовления СЭ транзисторов с графеновым каналом, 4) разработан и изготовлен стенд для изгибных испытаний и испытаний на растяжение, 5) рассчитаны зависимости рабочих механических напряжений в функциональных слоях при рабочих параметрах изгиба и растяжения, 6) исследовано влияние заряженных дефектов и мёртвых слоёв на границах раздела на встроенные электрические поля и их динамику в рабочих структурах. К настоящему моменту изготовлены первые рабочие образцы: 1) гибких сегнетоэлектрических конденсаторов на основе пленок $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ (10 нм) (Рис. 1а,б), 2) жёстких СЭ транзисторов с кремниевым каналом, 3) жёстких СЭ транзисторов с графеновым каналом (Рис. 1с).

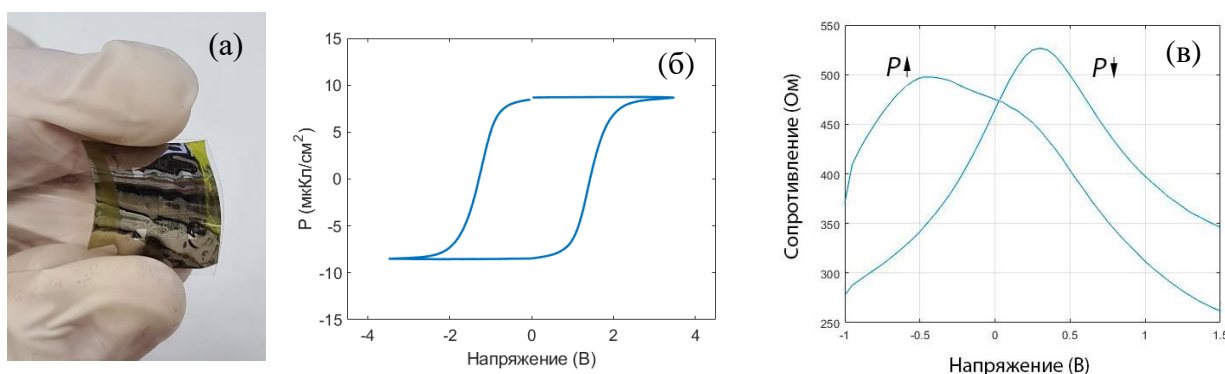


Рисунок 1. (а) фото образца гибких СЭ конденсаторов, (б) P - V кривая гибкого СЭ конденсатора, (в) СЭ полевой эффект в графеновом транзисторе.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 20-19-00370).

1. T.S. Boscke, J. Muller, D. Brauhaus, U. Schröder, U. Böttger, *Appl. Phys. Lett.* **99**, 102903 (2011).
2. H. Yu et al., *Adv. Funct. Mater.* **27**, 1700461 (2017).